

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析

杨丽娜^{1,2}, 贾德彬^{1,2*}, 高瑞忠^{1,2}, 苏文旭^{1,2}, 卢方园^{1,2}, 郝玉胜^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010010)

摘要: 通过采集闪电河流域 2020 年 2 月至 2022 年 2 月的降水与 2021 年的丰(8 月)和枯(10 月)水期的地表水和地下水, 运用稳定同位素技术, 对流域“三水”的氢氧稳定同位素进行时空变化分析, 探讨水体同位素与环境因子的关系, 结合 HYSPLIT 模型追踪大气水汽来源, 利用端元混合模型揭示水体转换关系. 结果发现, 当地降水线的斜率和截距均小于当地大气降水线, 水汽主要来自西风水汽、极地气团和东亚季风环流, 降水同位素有显著的温度效应; 时间上, 地表水与地下水同位素在季节变化上均表现出枯水期较丰水期更富集, 地表水与地下水 d -excess 值均低于全球平均值, 显现出当地强烈的蒸发作用; 空间上, 地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值丰枯季节在空间上具有相同的变化特征, 呈现上游至下游逐渐富集, 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 高值区空间分布不均, 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随埋深的增加更加贫化; 地下水水线斜率最高在丰水期为 7.87, 与当地大气降水线和地表水水线斜率十分接近, 表明丰水期“三水”存在复杂的水力联系. 研究区在丰水期地表水主要接受降水的补给, 其次是接受地下水的径流补给. 研究结果有助于明确闪电河流域同位素变化特征反映的水文信息, 为揭示干旱半干旱区水文循环提供理论依据.

关键词: 闪电河流域; 降水; 氢氧同位素; 地下水与地表水; 水体转换

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3855-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207230

Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of “Three Waters” in Shandian River Basin

YANG Li-na^{1,2}, JIA De-bin^{1,2*}, GAO Rui-zhong^{1,2}, SU Wen-xu^{1,2}, LU Fang-yuan^{1,2}, HAO Yu-sheng^{1,2}

(1. Institute of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010010, China)

Abstract: In this study, we collected precipitation from February 2020 to February 2022 and the surface water and groundwater in the wet (August) and dry (October) periods of 2021 in the Shandian River Basin. Stable isotope technology was used to analyze the temporal and spatial changes in the hydrogen and oxygen stable isotopes of the “three waters” in the basin to explore the relationship between water isomorphs and environmental factors and to reveal the water conversion relationship using the end element mixing model. The results showed that the slope and intercept of the local precipitation line were smaller than the local atmospheric precipitation line. The water vapor mainly came from westerly water vapor, polar air mass, and East Asian monsoon circulation. The precipitation isotope had a significant temperature effect. In terms of time, the isotopes of surface water and groundwater were more enriched in the dry season than those in the wet season, and the d -excess values of surface water and groundwater were lower than the global average, indicating strong local evaporation. Spatially, the $\delta^{18}\text{O}$ value of the rivers had the same change characteristics in the wet and dry seasons, showing gradual enrichment from the upstream to the downstream, and the groundwater $\delta^{18}\text{O}$ high value area was unevenly distributed in space, with groundwater $\delta^{18}\text{O}$ values becoming more depleted with the increase in burial depth. The highest slope of the groundwater water line was 7.87 in the wet season, which was very close to the slope of the local atmospheric precipitation line and river water line, indicating that there was a complex hydraulic connection between the “three waters” in the wet season. The surface water in the study area was mainly supplied by precipitation during the wet season and then by groundwater runoff. These results can provide a theoretical basis for revealing the hydrological cycle in arid and semi-arid areas.

Key words: Shandian River Basin; precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; groundwater and surface water; water conversion

水资源既是人类赖以生存的物质基础, 又是维持当地社会经济可持续发展、保持生态环境健康和维系生态系统稳定的不可或缺的一部分^[1]. 我国西北地区是典型的干旱区, 在几十年的气候变化和人类活动影响下, 水文过程发生变化, 生态环境脆弱, 对气候变化响应敏感. 氢氧同位素被称为“水的指纹”, 是追踪水循环的天然示踪剂. 在水循环过程中, 水中的 D 和 ^{18}O 受到蒸发和凝聚的影响会产生分馏作用. D 和 ^{18}O 对自然界水循环及水文过程响应极其敏感, 对研究水循环具有重要的指示作用^[2]. 通过分析同位素的组成特征来监测流域的水文情况, 用于了解降水、地下水补给、地下水-地表水相

互作用和流域水文等水文地质过程^[3], 为深入研究流域水循环过程提供了技术手段和理论依据, 被广泛应用在识别自然界流域水循环和水文过程的研究中^[4,5]. 近年来, 国内外学者对雅鲁藏布江流域^[6]、脱甲河^[7]、白洋淀^[8]、石羊河流域^[9]、长江中下游地区^[10]、巴拉格尔河流域^[11]和智利北部高原^[12]等流域的不同水体中 D 和 ^{18}O 组成特征及时空变化进行了系统的分析, 识别了各流域水循环及水文过程,

收稿日期: 2022-07-24; 修订日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869018, 52169003)

作者简介: 杨丽娜(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为同位素生态水文学, E-mail: 1656054047@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiaadb@263.net

对水资源的合理开发利用与评价和促进流域生态环境建设具有重要的理论意义。

闪电河流域是我国荒漠化监测和防治的重点区域,也是京津冀地区重要的水源和生态功能区^[13],目前,应用氢氧同位素技术的相关研究已在闪电河流域开展。贾德彬等^[14]分析水体中氢氧同位素的变化,判断出不同水体的变化特征及相互关系;苏文旭等^[15]利用氢氧稳定同位素技术,揭示不同水源 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布特征,计算出各潜在水源对杨树和柳树的贡献率;Jia 等^[16]以天然杨树为研究对象,应用同位素技术对其水分利用效率、水分吸收源、耗水量和水分利用策略进行了分析。以上研究主要针对闪电河流域水体同位素特征和植物水分利用规律取得了一定认识,但对流域同位素整体的空间分布规律及同位素变化的影响因子的识别的研究甚少。因此,本文选取闪电河流域为研究对象,探究不同季节降水、地表水和地下水“三水”水体同位素特征及时空变化规律,识别影响同位素变化的关键因子,揭示不同水体转化关系,以期为流域的生态建设及流域生态水文过程的作用机制的深入研究提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究概况

闪电河是滦河的上游,发源于河北省沽源与丰宁两县交界处,闪电河流域($115^{\circ}46' \sim 116^{\circ}20' \text{E}$, $41^{\circ}55' \sim 42^{\circ}30' \text{N}$)位于内蒙古锡林郭勒盟境内,总面积 $1\,551.68 \text{ km}^2$,海拔高程在 $1\,670 \sim 1\,247 \text{ m}$ 之间(图1),处于中温带半干旱大陆性季风气候区,是内蒙古高原向华北平原的过渡地带。风多雨少,无霜期短,春季干旱,降雨分配不均, $60\% \sim 70\%$ 降雨集中在 $6 \sim 9$ 月内,多年平均降水量为 360 mm ,四季分明,昼夜温差大。阴山山地向东延伸即为闪电河流域正蓝旗段,流域内河床坡度较缓,河曲发育,主要地形为河谷平原、丘陵及洼地,蓄水构造为山间断陷

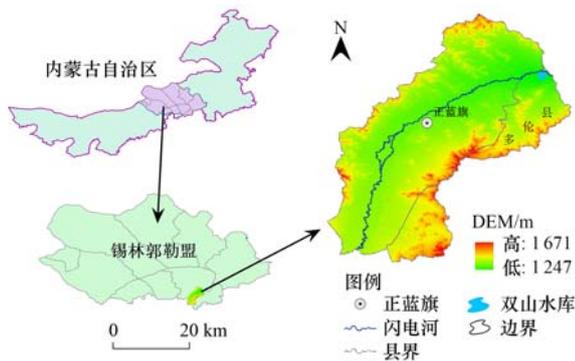


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

盆地蓄水构造。该流域物产丰富资源充足,草原湿地保存较好,是京津冀地区重要的生态屏障。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样品采集

本文以闪电河流域为研究对象(图2),为得出不同水体氢氧同位素的时空变化特征,根据研究区的地形及河流支流沿线布设采样点,降水的采集时间为2020年2月至2022年2月,地表水和地下水的采样时间为2021年的丰水期(8月)和枯水期(10月)。共布设地下水采样点35个,地表水采样点8个,降水收集点2处,在采样时段内共采集地下水样品70份,地表水样品16份,大气降水样品90份。降水利用漏斗与聚乙烯采样瓶来自制降水收集装置,为防止水分蒸发在漏斗上方放入一个乒乓球,每次降水结束后集中采集一次。地表水和地下水采样时均避开降雨事件,地表水取自流动的闪电地表水,地下水样品取自研究区内居民农用浅层地下水井,水样采集过程中,用采样水刷洗样品瓶3次后装入 250 mL 的聚乙烯瓶,用Parafilm膜密封并进行样品编号,用GPS定位采样点,记录经纬度及高程,所有样品均冷藏于 $0 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 的环境中带回实验室待同位素测定。

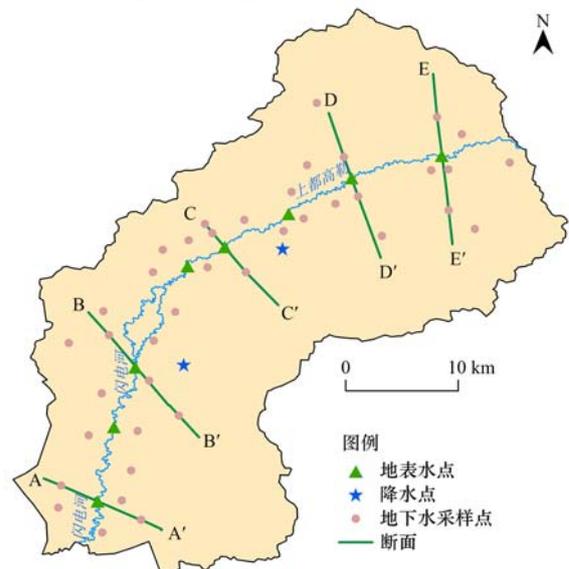


图2 采样点分布示意

Fig. 2 Distribution of sampling

1.2.2 样品处理与分析

采集的水样在实验室经 $0.2 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤至干燥清洁的玻璃瓶后,利用液态水稳定同位素分析仪LGR分析。样品测试前使其恢复室温,在每次测定前使用专业润滑剂润洗样针,每个样品分析6次,为了减小记忆效应,前2次分析结果舍弃,保证所得数据精准性。测得的氢氧稳定同位素含量为维也纳标准平均海水(V-SMOW)的千分偏

差,计算公式为:

$$\delta = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别为水样中和维也纳标准平均海水中的重同位素与轻同位素的比值. 当 δ 大于 0 时,表示样品中的重同位素值比标准值富集;当 δ 值小于 0 时,则表示重同位素比标准值贫化.

1.3 研究方法

1.3.1 后向轨迹模型

使用美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration) 空气资源实验室 (Air Resources Laboratory) 开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型 (HYSPLIT 模型), 分析大气水汽的运动轨迹^[17]. 应用该模型对研究区采样时间内 2021 年的 1、4、7 月和 9 月的水汽来源进行后向轨迹的模拟, 运行步长为 6 h, 追踪时长为 72 h, 模型输出的结果为降水前 3 d 内水汽的输送路径.

1.3.2 端元混合模型

利用端元混合模型, 可推算出各水体之间的补给比例, 其依据的原理是稳定同位素质量守恒, 公式为:

$$\delta C = \sum f_i \delta C_i \quad (2)$$

$$\sum f_i = 1 \quad (3)$$

式中, δC 为混合水体的氢氧同位素值, C_i 为第 i 个水源的氢氧同位素值, f_i 为第 i 个水源在混合水体中所占比例, 和值为 1.

2 结果与分析

2.1 降水同位素特征

2020 年 2 月至 2022 年 2 月闪电河流域大气降雨 δD 值变化区间为 $-147.32\text{‰} \sim -8.49\text{‰}$, 均值 -64.74‰ , $\delta^{18}O$ 变化区间为 $-18.75\text{‰} \sim -2.37\text{‰}$, 均值为 -9.27‰ . 雨水同位素值的变化可归因于其运输轨迹、降雨、温度和海拔效应.

Craig^[18] 通过对不同地理位置的河水、湖水、雨水和雪水样品进行分析, 建立了 δD 与 $\delta^{18}O$ 之间的线性关系方程: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 被定义为全球大气降水线 (GMWL). 大气降水线可反映流域的气候特征, 闪电河流域降水线 (LMWL) 方程为: $\delta D = 7.41\delta^{18}O + 3.97$ (图 3), 其斜率和截距均小于全球大气降水线, 表现了降水量仅为 $365 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均蒸发量高达 $1925 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的干旱区域气候特征, 加上降水降落过程中较强的蒸发分馏, 导致降水中重同位素的富集, 大气降水线的斜率和截距变小. 其斜率与截距与西北地区兰州^[19]、阿拉善^[20] 和阿尔泰^[21] 等地的大气降水线接近, 普遍小于全球大气降水线, 反映了

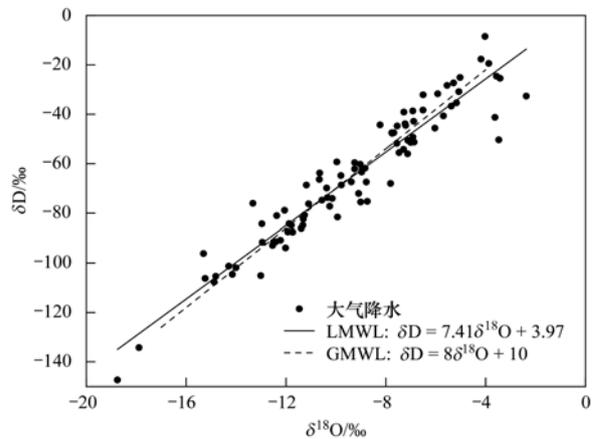


图 3 研究区全年大气降水线及比较

Fig. 3 Annual atmospheric precipitation line and comparison in the study area

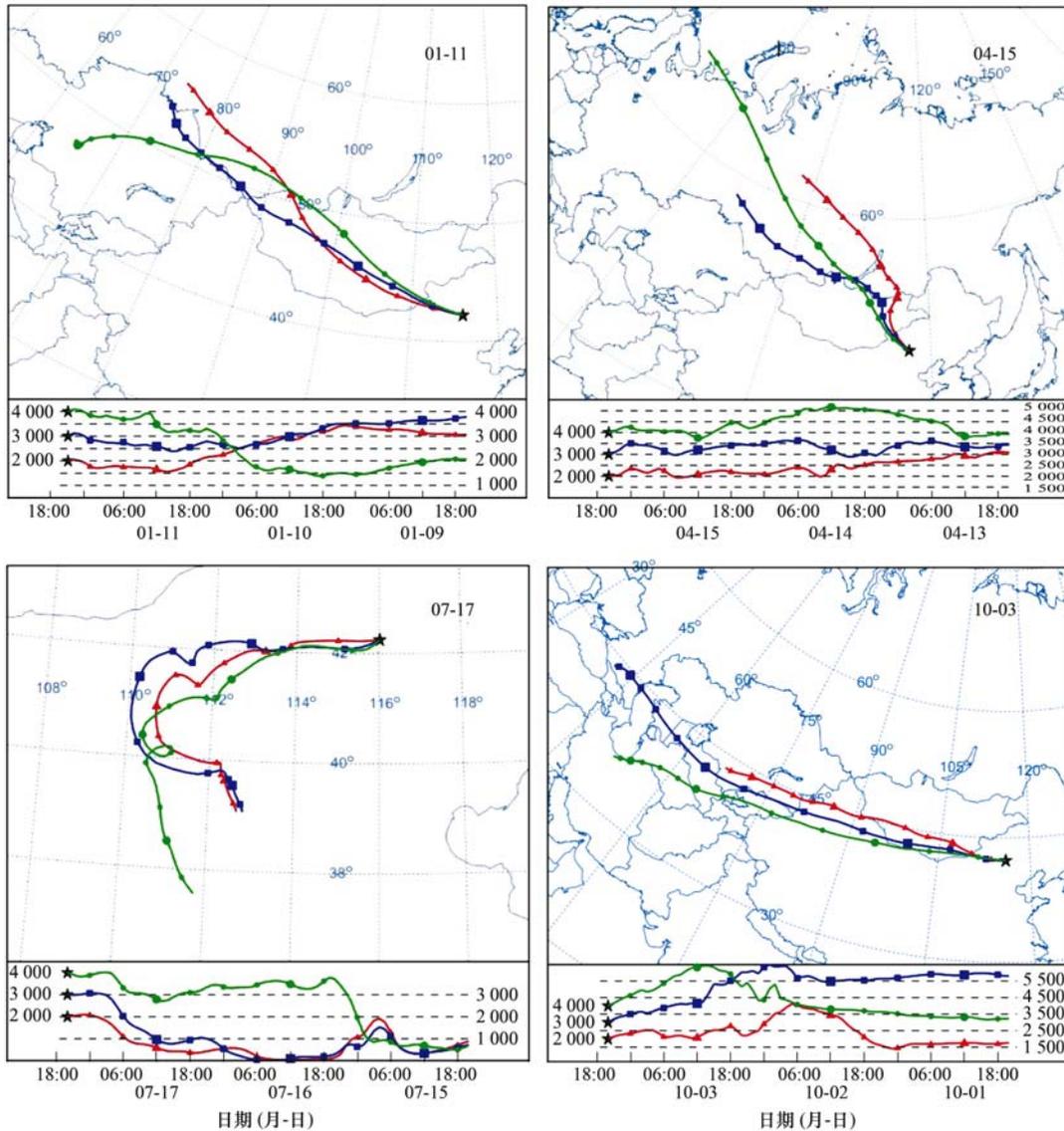
西北地区的干旱、蒸发量大的气候背景.

大气降水水汽运动轨迹在不同时间上存在一定程度的差异, 应用 HYSPLIT 模型确定研究区不同季节降水水汽来源. 综合 HYSPLIT 模型结果显示 (图 4), 闪电河流域在 1、4 月和 10 月的水汽主要来自西风水汽和极地气团, 经过长距离的水汽输送, 且受沿途蒸发的影响, 西风带与极地气团的到来使当地气候呈现气温低、干燥少雨的特点, 处于夏半年的 7 月份降水水汽来源主要为来自东南部的东亚季风环流, 随着季风的到来, 此时该地区降水较多、天气炎热. 对应了内蒙古降水集中在夏季, 蒸发量大于降水量的气候特点. 研究区水汽来源的特点与阿拉善^[20] 和兰州等周边地区^[22] 的研究所得出的结论相似, 符合大气环流条件.

我国降水同位素分馏过程中主要受到温度效应和降水量效应的控制, 温度的升高导致同位素分馏作用增强, 通过云下二次蒸发使降水氢氧同位素富集, 雨滴在穿过大气层时蒸发并与大气中的水汽相互作用, 会使降水中稳定同位素发生变化. 对降水同位素与同期气象因子 (气温、降水) 的相关关系分析如图 5 所示, 从中可知, 闪电河流域降水中的 $\delta^{18}O$ 值与同期降水量关系式为 $\delta^{18}O = 0.04P - 9.54$, 相关系数为 0.092, 无明显相关关系, 表明降水量不是影响降水同位素变化的主要因素. 大气降水 $\delta^{18}O$ 值与气温的相关关系式为 $\delta^{18}O = 0.36T - 14.69$, 相关系数为 0.66, $\delta^{18}O$ 值与气温呈现显著的正相关关系, 表明随温度的升高, $\delta^{18}O$ 值有富集的趋势. 降水中稳定同位素会因雨滴在穿过大气层时蒸发并与大气中的水汽相互作用而发生变化^[23], 降水量较大时, 受二次蒸发影响较小; 当降雨量较少时, 降水量受二次蒸发影响较大. 在降水丰沛的季节, 闪电河流域的降水量基本在 $1 \sim 30 \text{ mm}$ 内, 为小尺度降水, 其受到

云下二次蒸发的影响要大于同位素交换反应的影响^[24],所以同位素并没有表现出明显的降水效应,而是表现出显著的温度效应.另一方面,闪电河流域处于西北内陆地区,距离海洋遥远,流域水汽大部分

来自局地水汽蒸发,季风气候对其影响较弱,导致降水效应较弱.这与陕甘宁^[25]和银川平原^[26]等干旱区降水同位素对气象因子响应特点一致.这符合西北内陆干旱区的同位素对气候的特点^[23,27].



折线图单位:m

图 4 HYSPLIT 模型输出研究区每月降水水汽来源

Fig. 4 Hysplit model output monthly precipitation water vapor source in the study area

2.2 地表水同位素特征

地表水与地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在季节上具有相似的变化规律(表1),且枯水期 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的波动范围均大于丰水期,水体同位素组成变化具有季节性差异.丰水期地表水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别在 $-62.68\text{‰} \sim -53.48\text{‰}$ 和 $-7.60\text{‰} \sim -6.34\text{‰}$ 之间,枯水期变化范围在 $-86.3\text{‰} \sim -65.83\text{‰}$ 和 $-10.32\text{‰} \sim -8.35\text{‰}$ 之间,丰水期较枯水期 δD 和 $\delta^{18}O$ 更富集,推测在丰水期地表水虽有降水补给,但强烈的蒸发作用仍使地表水同位素变得富集. Dansgaard^[28] 提出氘盈余 ($d\text{-excess}$) 是研究大气降水

过程及受影响因素的重要的指标参数, $d\text{-excess}$ 值与水体受到的蒸发分馏作用相关, $d\text{-excess}$ 值越小其受到蒸发分馏作用越强^[29]. 地表水 $d\text{-excess}$ 均值在丰、枯水期分别为 -1.49‰ 和 2.88‰ , $d\text{-excess}$ 均值低于全球平均值 (10‰),经历了较强的蒸发作用. 地表水 $d\text{-excess}$ 值季节差异较大,丰水期较枯水期降水多,空气湿度高,降水中 $d\text{-excess}$ 值低,降水补给地表水,再加上丰水期地表水流量较大,河流流速较大,造成河谷平原面积增加,使沿途蒸发较多,因此,丰水期的 $d\text{-excess}$ 值较枯水期低,可以归因于降水 $d\text{-excess}$ 的高变异性以及河流沿途蒸发较大.

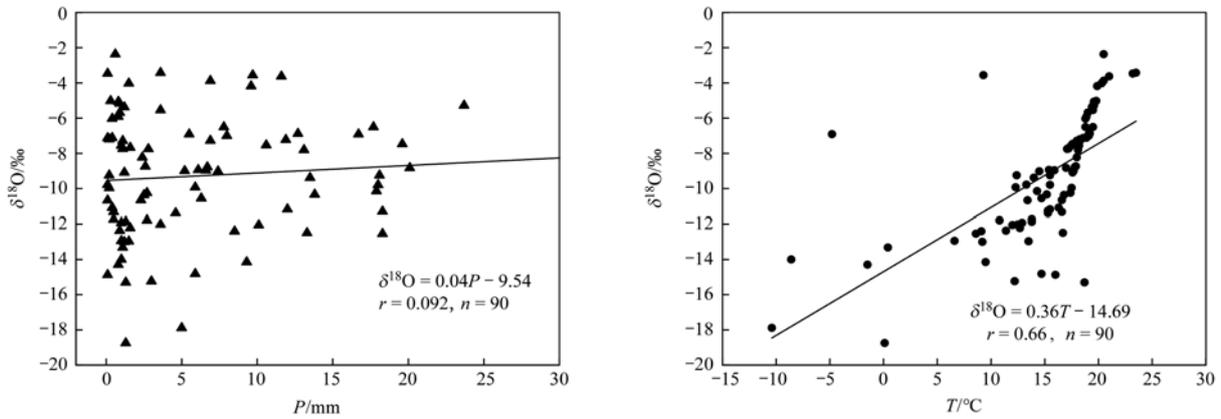


图 5 闪电河流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量和温度关系

Fig. 5 Precipitation in Shandian River Basin Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ value and precipitation and temperature

表 1 不同水体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d -excess 值变化

Table 1 Values of $\delta^{18}\text{O}$, δD , and d -excess vary in different water bodies

| 项目 | 水体 | $\delta\text{D}/\text{‰}$ | | | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | | | d -excess/ ‰ | | |
|-----|-----|---------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|-------------------------|-------|-------|
| | | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 |
| 丰水期 | 地表水 | -53.48 | -62.68 | -57.06 | -6.34 | -7.6 | -6.89 | -0.39 | -2.98 | -1.49 |
| | 地下水 | -67.91 | -86.21 | -76.32 | -9.26 | -10.63 | -10.12 | 10.58 | -2.17 | 4.63 |
| 枯水期 | 地表水 | -65.83 | -86.3 | -74.28 | -8.35 | -10.32 | -8.97 | 5.65 | -3.03 | 2.88 |
| | 地下水 | -70.51 | -86.83 | -78.8 | -9.3 | -11.94 | -10.5 | 13.27 | -2.9 | 5.21 |

地表水同位素组成在空间上的变化特点在一定程度上能较好地指示其与地下水和降水的补给关系. 闪电河流域地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在不同季节沿流程变化如图 6 所示. 空间变化上河流 $\delta^{18}\text{O}$ 值丰枯季节具有相同的变化特征, 整体上沿河流流向从上游到下游总体富集. 这与艾比湖流域河水^[30]和长江水^[31]中氢氧同位素组成具有相似的变化规律. 与其不同的是, 闪电河流域位于农牧交错带, 地势平坦, 上游至下游坡度较低, 其地表水同位素值受地形坡度影响较小, 河流两岸农牧业生产活动和居民点频繁分布, 对流域水循环和各水文过程产生较大影响, 同时地表水同位素空间变化往往还受不同水源的补给和

蒸发富集作用共同影响. 上游段为河流中下游的补给水源, 其相比中下游受到的沿程蒸发较小, 同位素值较为贫化, 中游段河流 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高, 是由于正蓝旗政府位于中游段, 城市集中, 受城市人类活动影响, 同位素富集的生活污水的支流汇入引起城市河流的 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍高于相应的非城市河水^[32,33], 具有较高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的中游地表水通过径流通道补给下游地表水, 同时在地表水流动过程中水面逐渐增宽, 水流变缓, 受蒸发分馏作用的影响更大, 使得下游地表水同位素值更高.

2.3 地下水同位素特征

丰水期地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别在

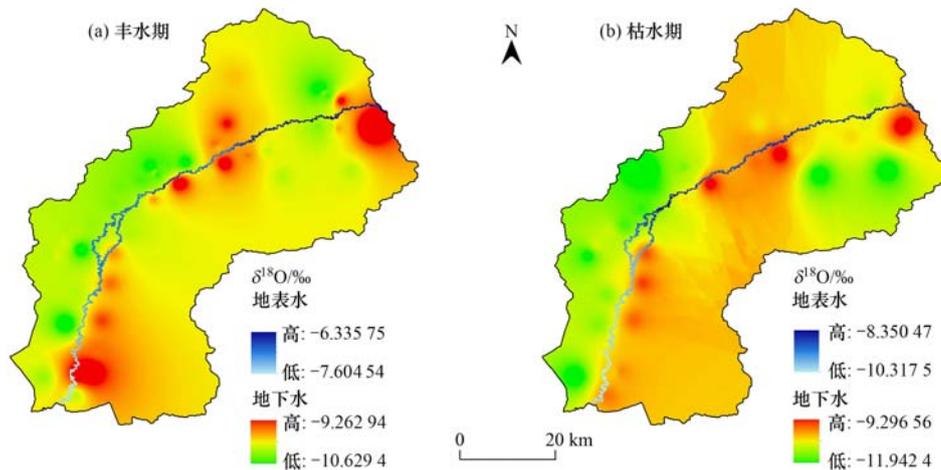


图 6 闪电河流域水体 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空分布

Fig. 6 Water body of Shandian River Basin temporal and spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$

-86.21‰ ~ -67.91‰和 -10.63‰ ~ -9.26‰之间, 枯水期变化范围在 -86.83‰ ~ -70.51‰和 -11.94‰ ~ -9.30‰之间, 丰枯季节差异较小, d_{excess} 在丰、枯水期的均值分别为 4.63‰和 5.21‰, 可以看出, 无论丰水期还是枯水期, 地下水同位素要比地表水同位素更贫化, 显示出地表水经历更强的蒸发作用。

地下水同位素表现出较大的空间变异性, 高值区在丰水期分布比枯水期少, 河流左侧地下水同位素值普遍比河流右侧偏低, 且大多数高值区出现在靠近河流处, 主要由于地下水取自第四系松散沉积物造成的孔隙潜水, 河床两侧含水层厚度大, 地下水埋深小, 与地表水相互转化频繁, 而附近地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高. 丰水期上游地下水埋深为 3 ~ 6 m, 其同位素值较大与密集的农业活动及地下水埋深有关, 密集的农业活动标志着提取大量地下水, 随后通过灌溉回流补给过程使地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现蒸发富集, 而下游地区地下水受双山水库水及河流水补给, 地下水位在 2 ~ 9 m 范围内, 受蒸发作用较小, 同位素较为贫化. 枯水期河流上游右侧及下游左侧 $\delta^{18}\text{O}$ 值变高, 主要是由于农业活动停止, 上游地下水位回升, 埋深较小(2 ~ 4 m), 受潜水蒸发的影响, 同位素较富集; 枯水期受农业灌溉影响使得地下水位暂时无法恢复, 下游地区河水流量变小不能充分补给地下水, 导致地下水埋深较大(5 ~ 10 m), 很难接受降水补给, 同时在枯水期降水量少, 蒸发强度大, 使地表水同位素富集, 此时地表水与地下水之间相互转换, 导致地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值富集。

由上述分析可知地下水氢氧同位素与埋深存在一定相关关系, 因此, 根据地下水统测埋深与 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值, 进一步分析其相关关系, 得出地下水埋深与同位素关系如图 7 所示. 研究区地下水埋深在 1 ~ 10 m 间, 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随埋深的增加更加贫化, 其产生的原因可能为地下水埋深越大, 由浅到深, 地下水接受大气降雨和地表水补给的作用逐渐减弱, 受侧向径流的影响增加, 且深层地下水受到的蒸发分馏作用较弱, 水中同位素较贫化. 这与王雨山等^[8]研究的结果一致。

3 讨论

大气降水到达地面后, 一部分下渗补给地下水, 另一部分直接成为地表水, 河流地表水与地下水也存在水量和能量的交换, 且这种交换会被气候、地质构造和流域面积等因素影响^[34]. 根据测得的丰水期和枯水期的地表水和地下水中的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行回归分析, 并参照大气降水线将 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 线性

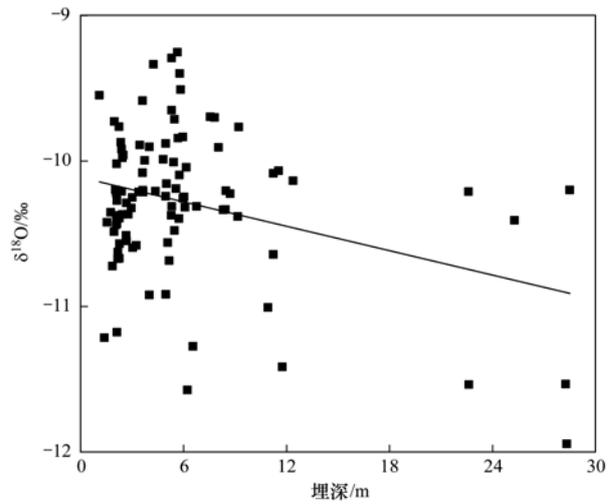


图 7 地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与埋深

Fig. 7 Groundwater $\delta^{18}\text{O}$ value and buried depth

关系定义为地表水线(RWL)和地下水线(GWL)见图 8, 水线的斜率和截距分别表示氧的分馏速率和偏离程度^[35], 根据水线关系可定性分析流域水体补给关系. 丰水期地表水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值比枯水期大, 丰水期地表水水线方程的斜率和截距均小于枯水期, 但二者斜率均小于当地降水线斜率, 这是由于不同季节温度和降雨量等气象因子具有差异, 大气降水补给河流后, 河流受到不同程度的蒸发作用, 丰水期 RWL 斜率(7.50)与当地大气降水线斜率接近, 表明处于丰水期的地表水受降水补给较多, 枯水期 RWL 斜率为 5.11, 其斜率小于当地大气降水线, 表明地表水受降水补给量较少且受蒸发作用. RWL 斜率的季节差异还与温度有关, 根据瑞利平衡条件可知, 温度越低, 分馏系数越高(脱甲河), 在温度较低的 10 月, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在蒸发和凝结过程中, 发生了一定程度的偏离, 且枯水期在河流水位、流量和流速方面均比丰水期小, 温度的变化对河水同位素的影响较大^[28], RWL 斜率与截距较小, 其符合水循环过程同位素变化规律^[36]。

地下水稳定同位素组成受到一定程度的蒸发分馏影响, 但影响程度弱于地表水, 所以 GWL 的斜率要大于 RWL. GWL 具有季节性差异, 斜率最高在丰水期为 7.87, 与当地大气降水线和 RWL 斜率十分接近, 且丰水期 GWL 在 RWL 下方, 表明丰水期“三水”存在复杂的水力联系. 枯水期 GWL 为 $\delta\text{D} = 5.86\delta^{18}\text{O} - 17.27$, 斜率大于地表水线(5.11), 远小于当地大气降水线, 同位素组成贫化的水流向同位素组成富集的水, 枯水期地表水与地下水同位素值有重合部分, 枯水期研究区降水十分稀少, 降水补给微小, 说明此时地表水与地下水相互转换。

基于上述同位素关系分析, 丰水期大气降水较

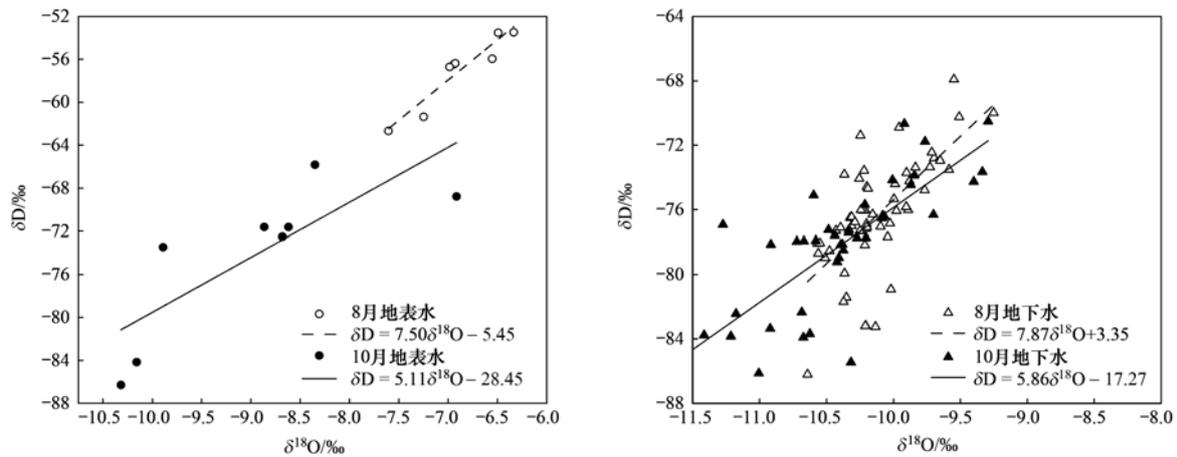
图8 不同季节地表水和地下水 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系Fig. 8 Surface water and groundwater in different seasons δD and $\delta^{18}O$ relationship

表2 不同断面水体转化率/%

Table 2 Water conversion rate of different sections/%

| 水体 | 转化率 | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 断面 A-A' | 断面 B-B' | 断面 C-C' | 断面 D-D' | 断面 E-E' |
| 降水 | 74.4 | 71.35 | 77.17 | 73.01 | 78.20 |
| 地表水 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 地下水 | 25.6 | 28.65 | 22.83 | 26.99 | 21.80 |

多, 水体补给关系较复杂, 沿河流上游至下游布设 5 个断面(图 2), 利用端元混合模型对丰水期水体转换关系进行定量分析, 各断面水体的转换比例如表 2 所示, 研究区降水对地表水的补给均大于 50%, 表明流域主要接受降水的补给, 其次是接受地下水的径流补给, 且下游地下水对地表水的补给比例大于上游, 地下水对地表水补给最小比例在下游 E-E' 断面, 为 21.80%, 最大在上游的 B-B' 断面, 为 28.6%。各断面补给比例差异较小, 下游地下水埋深较大, 且夏季农业用水量较为频繁, 地下水埋深较大, 地表水受地下水补给较少. 证实了闪电河流域地下水的排泄方式是补给河水的研究^[37]。

4 结论

(1) 闪电河流域降水线 (LMWL) 方程为: $\delta D = 7.41\delta^{18}O + 3.97$. 运用 HYSPLIT 模型模拟出研究区的水汽来源主要为来自西风水汽、极地气团和东亚季风环流. 降水同位素表现出明显的温度效应但没有显著的降水效应。

(2) 地表水丰水期的 d -excess 值较枯水期低, 可以归因于降水 d -excess 的高变异性以及河流沿程蒸发较大, 河流 $\delta^{18}O$ 值丰枯季节具有相同的变化特征, 整体上从上游到下游总体富集, 受人类活动影响较大; 无论丰水期还是枯水期, 地下水同位素要比地表水同位素更贫化, d -excess 值更高, 显示出地表水经历更强的蒸发作用. 地下水丰水期 $\delta^{18}O$ 高值区

主要集中在左下游, 高值区在丰水期分布比枯水期少, 受地下水埋深影响较大。

(3) 通过对不同季节的各水体水线特征分析, 得知丰水期地表水水线方程的斜率和截距均大于枯水期, 且二者斜率小于当地降水线斜率, 丰水期地下水水线与当地大气降水线和地表水线斜率十分接近, 表明丰水期“三水”间转换复杂, 枯水期地表水与地下水同位素值有重合部分, 此时地表水与地下水相互转换. 结合端元混合模型进一步分析丰水期补给关系, 得出地表水接受降水的补给, 其次是接受地下水的径流补给, 且上游地下水对地表水的补给比例大于下游的结论。

参考文献:

- [1] 韩振华, 张燕飞, 王慧琪, 等. 干旱半干旱荒漠化草原区降水-地表水-地下水同位素分布特征——以达尔罕茂明安联合旗为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11463-11471. Han Z H, Zhang Y F, Wang H Q, et al. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the arid and semi-arid desertification steppe: a case study in the Darhan Maomingan Joint Banner[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(28): 11463-11471.
- [2] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods [J]. Oecologia, 2005, 144(4): 520-527.
- [3] Sappa G, Vitale S, Ferranti F. Identifying karst aquifer recharge areas using environmental isotopes: a case study in central Italy [J]. Geosciences, 2018, 8(9), doi: 10.3390/geosciences8090351.
- [4] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean

- climate[J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(2): 100-104.
- [5] 李广, 章新平, 张立峰, 等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- [6] Ren W, Yao T D, Xie S Y. Stable isotopic composition reveals the spatial and temporal dynamics of discharge in the large river of Yarlungzangbo in the Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 373-381.
- [7] 吴红宝, 赵强, 秦晓波, 等. 脱甲河氢氧同位素组分时空分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(5): 1461-1469.
- Wu H B, Zhao Q, Qin X B, *et al.* Temporal and spatial variations of hydrogen and oxygen isotopes in Tuoqia River and its influencing factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(5): 1461-1469.
- [8] 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1920-1929.
- Wang Y S, Yin D C, Qi X F, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1920-1929.
- [9] Zhu G F, Sang L Y, Zhang Z X, *et al.* Impact of landscape dams on river water cycle in urban and peri-urban areas in the Shiyang River Basin: evidence obtained from hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **602**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126779.
- [10] 李静, 吴华武, 周永强, 等. 长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1176-1183.
- Li J, Wu H W, Zhou Y Q, *et al.* Variations of stable oxygen and deuterium isotopes in River and Lake waters during flooding season along the middle and lower reaches of the Yangtze River regions[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1176-1183.
- [11] 房丽晶, 高瑞忠, 贾德彬, 等. 内蒙古草原巴拉格尔河流域不同水体转化特征及环境驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(3): 860-868.
- Fang L J, Gao R Z, Jia D B, *et al.* Characteristics and environmental driving factors of water transformation in the Balaguer River watershed of Inner Mongolia steppe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(3): 860-868.
- [12] Voigt C, Herwartz D, Dorador C, *et al.* Triple oxygen isotope systematics of evaporation and mixing processes in a dynamic desert lake system[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, **25**(3): 1211-1228.
- [13] 冯金周, 陈明叶, 于连海, 等. 闪电河流域中游区长时间序列土地利用动态变化对植被的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2018, **41**(1): 31-37.
- Feng J Z, Chen M Y, Yu L H, *et al.* Effects of land use dynamics on Vegetation in a long time sequence about the middle reaches area of the Shamelian River Basin[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2018, **41**(1): 31-37.
- [14] 贾德彬, 王蓉, 李文宝, 等. 闪电河流域“三水”季节变化特征[J]. *干旱区研究*, 2017, **34**(2): 251-258.
- Jia D B, Wang R, Li W B, *et al.* Seasonal change of δD and $\delta^{18}O$ in surface water, groundwater and precipitation in the Lightning River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2017, **34**(2): 251-258.
- [15] 苏文旭, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 浑善达克沙地南缘人工固沙植被水分利用特征[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(6): 1980-1988.
- Su W X, Jia D B, Gao R Z, *et al.* Water use characteristics of artificial sand-fixing vegetation on the southern edge of Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(6): 1980-1988.
- [16] Jia D B, Li X S, Zhang Y Q, *et al.* Analysis on water use strategies of natural poplar in Hunshandake Sandy Land, China [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, **40**(3), doi: 10.1002/ep.13579.
- [17] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, **47**: 295-308.
- [18] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [19] Ma J Z, Zhang P, Zhu G F, *et al.* The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **436-437**: 92-101.
- [20] 王帅, 饶文波, 金可, 等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, **47**(5): 411-419.
- Wang S, Rao W B, Jin K, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, **47**(5): 411-419.
- [21] 段丽洪, 王圣杰, 张明军, 等. 阿尔泰山降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(4): 1042-1049.
- Duan L H, Wang S J, Zhang M J, *et al.* Stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and water vapor source in the Altay Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(4): 1042-1049.
- [22] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- Chen F L, Zhang M J, Ma Q, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and water vapor sources in Lanzhou city and its surrounding area [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- [23] 李佳奇, 黄亚楠, 石培君, 等. 陕北黄土区大气降水同位素特征及其水汽来源[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(6): 1459-1465.
- Li J Q, Huang Y N, Shi P J, *et al.* Isotopic characteristics and vapor sources of atmospheric precipitation in the loess region of North Shaanxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(6): 1459-1465.
- [24] Yang Q C, Mu H K, Guo J C, *et al.* Temperature and rainfall amount effects on hydrogen and oxygen stable isotope in precipitation[J]. *Quaternary International*, 2019, **519**: 25-31.
- [25] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(7): 2191-2200.
- Liu J Y, Zhang F P, Feng Q, *et al.* Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(7): 2191-2200.
- [26] 高阳, 韩磊, 韩永贵, 等. 银川平原降水氢氧稳定同位素时间尺度效应及水汽来源[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(1): 91-

- 102.
- Gao Y, Han L, Han Y G, *et al.* Time scale effect of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation and source of water vapor in Yinchuan Plain[J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(1): 91-102.
- [27] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2122-2131.
- Yuan R F, Li Z X, Cai Y Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of stable isotopes in precipitation at an Arid Inland River Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2122-2131.
- [28] Dansgaard W. The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461-469.
- [29] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [30] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 基于氢氧稳定同位素的艾比湖流域地表水与地下水转化关系[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(4): 172-177, 185.
- Hao S, Li F D, Li Y H, *et al.* Transformation between surface water and groundwater in Ebinur Lake basin based on hydrogen and oxygen stable isotopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(4): 172-177, 185.
- [31] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, **87**(5): 661-676.
- Ding T P, Gao J F, Shi G Y, *et al.* Spacial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River Water and their environmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, **87**(5): 661-676.
- [32] Li X N, Weng B S, Yan D H, *et al.* Anthropogenic effects on hydrogen and oxygen isotopes of river water in cities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(22), doi: 10.3390/ijerph16224429.
- [33] 周毅, 吴华武, 贺斌, 等. 长江水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 时空变化特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(5): 678-686.
- Zhou Y, Wu H W, He B, *et al.* Study on spatial and temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Yangtze River Water and its factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(5): 678-686.
- [34] 吴华武. 湘江中下游地区不同水体中稳定同位素变化特征研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- Wu H W. Study on characteristics of stable isotopes of different bodies in the mid-and-lower reaches of Xiangjiang River [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012.
- [35] 黄一民. 洞庭湖流域水循环中稳定同位素的变化特征及其影响机制研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- Huang Y M. Study of variable characteristics of stable water isotope composition in water cycle and its influence mechanism in the Dongting Lake Basin [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2013.
- [36] 吴华武, 章新平, 李小雁, 等. 湘江流域中下游长沙地区不同水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的变化[J]. *地理科学*, 2014, **34**(4): 488-495.
- Wu W H, Zhang X P, Li X Y, *et al.* Changes of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in different water bodies in Changsha area in the middle and lower reaches of the Xiangjiang River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(4): 488-495.
- [37] 孙铁军. 闪电河流域内蒙段水资源评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- Sun T J. The assessment of water resource in Shandianhe River region of Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.

CONTENTS

| | |
|---|--|
| Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region | YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627) |
| Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China | XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637) |
| Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance | ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649) |
| Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning | DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660) |
| Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology | ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669) |
| Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model | WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676) |
| Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM | ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685) |
| Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province | LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695) |
| Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China | DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705) |
| Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 | YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715) |
| Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 | XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724) |
| Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model | WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738) |
| Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei | JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749) |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers | ZHU Shu-hui (3760) |
| Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles | YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771) |
| Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer | GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779) |
| Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area | YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788) |
| Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an | WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797) |
| Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei | XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809) |
| Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area | WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820) |
| Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City | LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835) |
| Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang | ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846) |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin | YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855) |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River | YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864) |
| Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River | ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872) |
| Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction | WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881) |
| Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas | WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892) |
| Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region | YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902) |
| Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches | ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913) |
| Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region | YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923) |
| Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River | LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933) |
| Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River | ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945) |
| Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons | GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957) |
| Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite | SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970) |
| Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water | LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978) |
| Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid) | ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990) |
| Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics | XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997) |
| Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China | WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006) |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing | JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017) |
| Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province | FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027) |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi | FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039) |
| Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum | HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052) |
| Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review | ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059) |
| Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review | LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077) |
| Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis | ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091) |
| Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil | LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100) |
| Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation | WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109) |
| Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta | ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119) |
| Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA | HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130) |
| Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area | ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142) |
| Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province | ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151) |
| Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> | LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162) |
| Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk | ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170) |
| Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period | QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179) |
| Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong | LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191) |
| Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning | YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201) |